



# Caractérisation Hyperfréquence Large Bande de Matériaux Magnétiques dans Différents Etats d'Aimantation

July Cortes, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier

## ► To cite this version:

July Cortes, Patrick Queffelec, Alexis Chevalier. Caractérisation Hyperfréquence Large Bande de Matériaux Magnétiques dans Différents Etats d'Aimantation. 18èmes Journées Nationales Microondes, May 2013, Paris, France. 4 p. hal-00951713

**HAL Id: hal-00951713**

**<https://hal.univ-brest.fr/hal-00951713>**

Submitted on 25 Feb 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Caractérisation Hyperfréquence Large Bande de Matériaux Magnétiques dans Différents Etats d'Aimantation

July CORTES<sup>1</sup>, Patrick QUEFFELEC<sup>1</sup>, Alexis CHEVALIER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lab-STICC UMR 3192 – Université de Bretagne Occidentale, 6 Avenue le Gorgeu CS 93837, 29238 Brest Cedex 3  
July-Paola.Cortes@univ-brest.fr

### Résumé

Ce travail décrit le protocole expérimental et les améliorations apportées à une méthode développée au laboratoire pour la caractérisation des matériaux magnétiques quel que soit leur état d'aimantation. La méthode est basée sur la mesure d'une ligne de transmission de type triplaque non réciproque, chargée par l'échantillon à mesurer. Les paramètres  $S$  théoriques sont calculés à partir d'une analyse modale associée à un raccordement des champs dans les différentes régions de la structure. Les éléments du tenseur de perméabilité sont alors déterminés grâce à une procédure d'optimisation numérique large-bande faisant converger les paramètres  $S$  théoriques vers ceux mesurés.

### 1. Introduction

Les ferrites polycristallins sont largement utilisés dans les dispositifs hyperfréquences tels que les circulateurs et déphaseurs, pour leurs résistivité électrique et non-réciprocité élevées. C'est pourquoi, il est nécessaire de bien décrire leur comportement dynamique, lequel est représenté par une perméabilité tensorielle.

Les méthodes usuelles, comme celle basée sur l'utilisation d'une ligne coaxiale [1], ne sont utilisées que pour l'état désaimanté où la perméabilité reste scalaire. C'est pourquoi, il a été développé dans notre laboratoire une méthode de caractérisation large bande « in situ » qui permet de remonter aux éléments diagonaux et extra diagonaux du tenseur de perméabilité quelque soit l'état d'aimantation du matériau [2].

### 2. Description de la Méthode

La cellule de mesure utilisée dans notre méthode est présentée Figure 1. Il s'agit d'une ligne triplaque partiellement remplie par l'échantillon magnétique à caractériser. Sous les bords latéraux du ruban métallique sont placés deux diélectriques de permittivité  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  différentes afin de garantir le comportement non-réciproque ( $S_{12} \neq S_{21}$ ) de la cellule. Cette non-réciprocité est indispensable pour avoir suffisamment d'informations mesurées et remonter en une seule phase expérimentale aux éléments complexes diagonaux et extra diagonaux du tenseur ( $\mu$ ,  $\kappa$ ). Pour le dépouillement des mesures : la méthode s'appuie sur une analyse

dynamique qui permet de déterminer le diagramme de dispersion des modes se propageant dans les sections chargée et vide de la cellule puis, un raccordement modal selon la direction de propagation est réalisé pour l'obtention des paramètres  $S$  théoriques de la structure. Cette étape de calcul nécessite la connaissance préalable des caractéristiques intrinsèques  $\epsilon(\omega)$ ,  $\mu(\omega)$  et  $\kappa(\omega)$ . Nous avons choisi de représenter ces trois fonctions de la fréquence par des modèles théoriques physiques tels que le modèle de Debye pour la permittivité et le modèle GPT [3] pour la perméabilité.

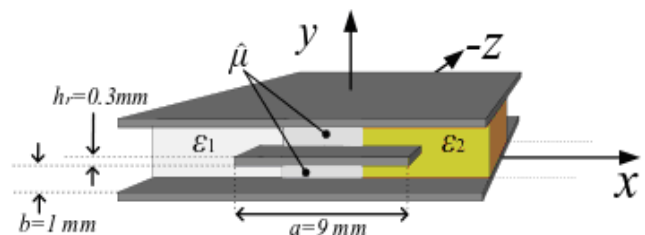


Figure 1 Cellule de Mesure

Enfin, la procédure d'optimisation utilisée pour faire converger les paramètres théoriques vers ceux mesurés, prend comme variables d'ajustement les paramètres d'entrée de ces lois physiques.

### 3. Protocole de Mesure

Le protocole de mesure est divisé en trois étapes :

#### 3.a. Etalonnage

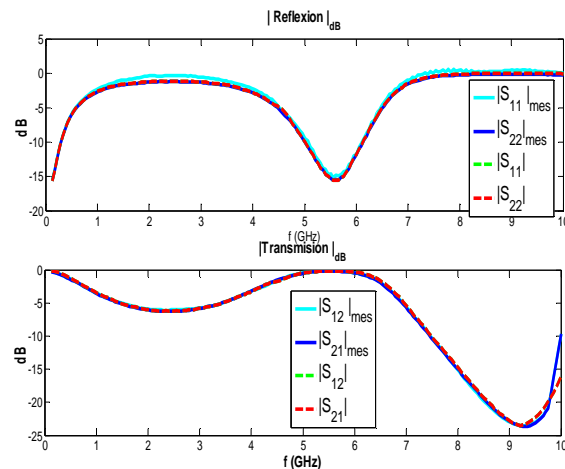
Pour l'étalonnage de l'analyseur de réseaux, nous utilisons une procédure de type SOLT au niveau des câbles de jonction. Ensuite une procédure de « Deembedding » (correction analytique) est réalisée pour tenir compte de la désadaptation d'impédance de la cellule, de la présence d'un « taper » coaxial-triplaque, ainsi que pour déplacer les plans de référence au plus près des faces de l'échantillon. Cette procédure additionnelle se base sur la théorie des lignes et l'écriture des matrices de transfert de la mise en cascade de quadripôles. Par rapport à la méthode originale [2], les améliorations portent sur :

- Correction d'impédance : La cellule de mesure présente un saut d'impédance, entre les accès

coaxiaux à  $50\Omega$  et la ligne triplaque à  $18\Omega$ . Pour modéliser cette transition nous avons choisi un changement progressif d'impédance variable en fréquence dans la bande de travail.

Ce changement d'impédance est déterminé à partir d'une mesure de référence. Celle-ci, au lieu d'être réalisée sur la cellule vide, est réalisée sur la cellule vide chargée avec le diélectrique placé sur le côté (cf. Fig. 1,  $\epsilon_2$ ). Cela permet de tenir compte, des imperfections de la cellule et de celles liées à l'insertion du diélectrique (imprécisions sur ses dimensions, ses pertes).

La Figure 2 présente la comparaison entre la mesure de référence et la réponse théorique calculée à partir de l'analyse dynamique après processus de « Dembedding ». La très bonne concordance nous permet de valider notre procédure d'étalonnage.



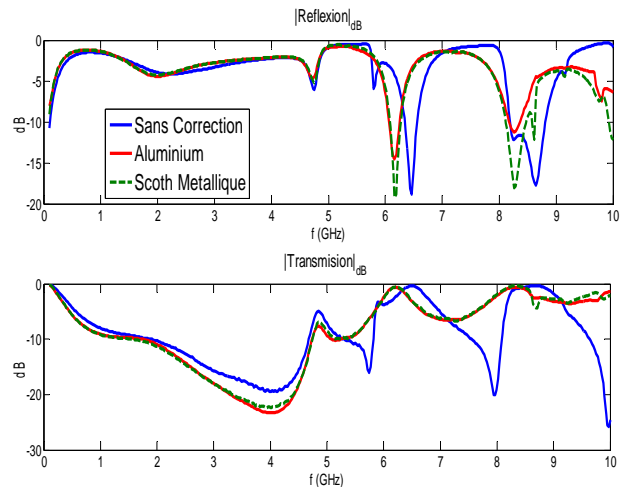
**Figure 2 Comparaison entre les paramètres S théoriques et mesurés après la procédure d'étalonnage.**

- **Correction des lames d'air :** Puisqu'en pratique, pour pouvoir être inséré facilement dans la cellule, l'échantillon présente une hauteur légèrement inférieure à celle de la ligne (1mm), il existe une lame d'air entre l'échantillon et les plans de masse. Ces lames d'air perturbent fortement la mesure en particulier en haute fréquence, réduisant de fait la bande de validité de la méthode et cette réduction affecte la sensibilité de la méthode.

Expérimentalement, nous avons sensiblement amélioré les mesures en comblant ces lames d'air avec un papier d'aluminium. En insérant un nombre suffisant de couches (épaisseur  $20\mu\text{m}$ ) nous comblons les lames d'air. Nous observons une moins grande sensibilité au bruit de mesure et une atténuation des résonances parasites. Les Figure 3 et Figure 4 présentent les paramètres S mesurés pour deux échantillons de même hauteur (0.96mm) mais de longueur différente et à des états d'aimantation différents.

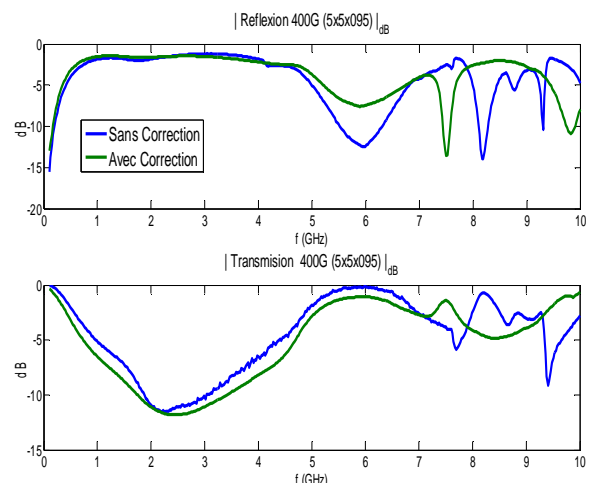
Le premier échantillon présente une longueur de 18mm dans la direction de propagation (direction z, Figure 1). Nous observons sur la Figure 3 les effets apportés par le comblement des lames d'air, en fréquence et en amplitude, sur les résonances

présentes dans le haut de la bande exploitée. Nous avons aussi testé plusieurs conducteurs comme le scotch ruban métallique (cuivre), le meilleur résultat ayant été obtenu avec le papier d'aluminium.



**Figure 3 Paramètres S mesurés pour un échantillon de ferrite (longueur 18 mm) à l'état désaimante, avec et sans comblement du gap d'air.**

La Figure 4 montre les effets sur les paramètres S mesurés du comblement des lames d'air pour un échantillon court, de longueur 5mm dans la direction z, avec un champ appliqué de 400 Oe. Nous notons que cette correction amène une mesure moins bruitée, avec moins de résonances parasites, notamment dans la partie haute du spectre. Cette réduction des phénomènes parasites est très importante pour le processus d'optimisation inverse car elle permet de converger vers une réponse correspondant à la réalité physique du matériau et également de réduire le temps de calcul.



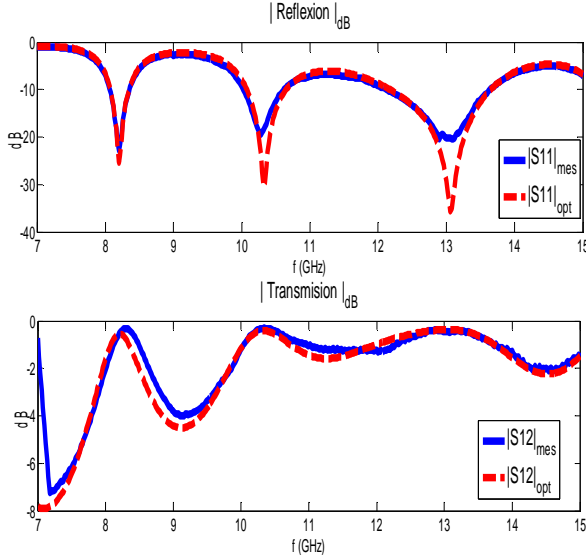
**Figure 4 Paramètres S mesurés pour un échantillon de ferrite court (longueur 5mm) pour un champ appliqué de 400Oe, avec et sans comblement du gap d'air.**

### 3.b. Mesure de la permittivité

Pour simplifier la procédure d'optimisation, le protocole expérimental consiste à déterminer en premier lieu la permittivité de l'échantillon désaimanté dans une

configuration symétrique ( $\epsilon_2 = \epsilon_1$ ). Pour cela, nous profitons du fait que le comportement magnétique disparaît dans la partie haute fréquence du spectre.

La Figure 5 présente les résultats de l'optimisation des paramètres S dans la bande haute fréquence, là où le comportement du ferrite est purement diélectrique.



**Figure 5 Optimisation haute fréquence pour la détermination de la permittivité du ferrite YIG101 (TEMEX Ceramics).**

Par la suite, nous faisons l'hypothèse que la permittivité ne dépend pas du champ magnétique appliqué.

### 3.c. Mesure de la perméabilité tensorielle

Une fois la permittivité déterminée, sa valeur est figée dans la procédure d'optimisation, seule la partie magnétique peut varier. Les paramètres du tenseur de perméabilité sont alors recherchés à partir des mesures de la cellule dans sa configuration non-réciproque ( $\epsilon_2 \neq \epsilon_1$ ).

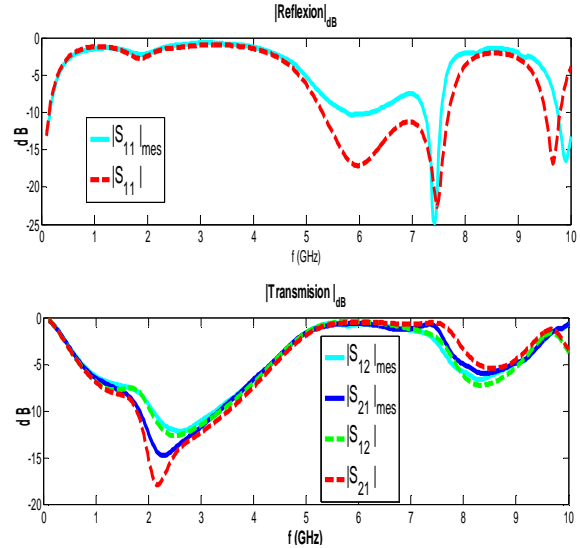
## 4. Résultats

Comme pour toute procédure d'optimisation, il est nécessaire de définir des critères pour la validation de la solution optimisée. Nous avons établi expérimentalement trois critères :

- La vérification de la concordance entre les amplitudes des paramètres S mesurés et optimisés sur toute la bande de mesure.
- Le calcul de l'erreur relative à chaque point de fréquence pour quantifier l'écart entre théorie et mesure.
- Le pourcentage des points de la courbe optimisée qui suivent la courbe de mesure : la différence entre les paramètres S optimisés et ceux mesurés restant inférieur à un seuil que nous avons fixé à 17%.

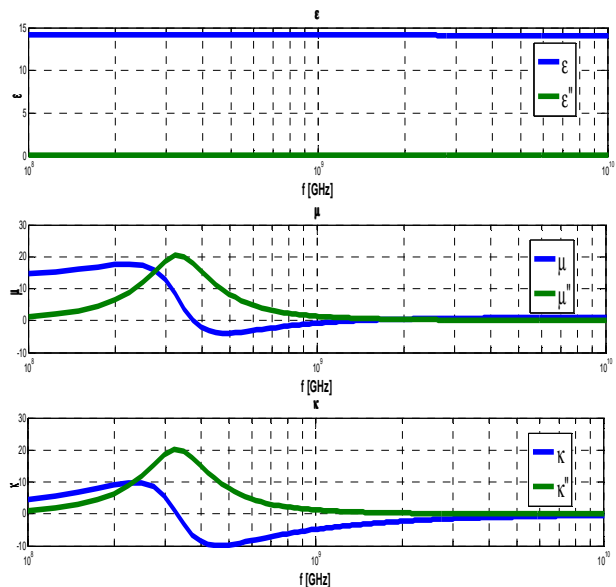
Les mesures présentées ici ont été réalisées sur un échantillon YIG101 (Yttrium-Iron-Garnet), fourni par la société TEMEX Ceramics.

La Figure 5 décrit l'optimisation des paramètres S dans le cas désaimanté pour la détermination de la permittivité. Nous avons utilisé pour cette mesure un échantillon long pour profiter des résonances des dimensions qui apportent alors autant d'informations supplémentaires pour l'optimisation. Les critères de validation, pour cette partie diélectrique sont une erreur relative de 7.3%, et un pourcentage de suivi de 94%. Ce qui valide la bonne concordance entre les résultats de l'optimisation et la mesure.



**Figure 6 Comparaison entre paramètres S mesurés et optimisés pour le YIG101 pour  $H_{app}=700Oe$ . Partie magnétique**

La Figure 6 décrit l'optimisation des paramètres S lorsque la réponse magnétique anisotrope est recherchée. La procédure d'optimisation conduit à une très bonne concordance entre les paramètres théoriques et ceux mesurés. Les critères de validation sont : une erreur relative de 12.5% en moyenne et un pourcentage de suivi de 88%.



**Figure 7 Spectres mesurés de  $\epsilon$ ,  $\mu$  et  $\kappa$  d'un ferrite de grenat d'yttrium (TEMEX Ceramics, réf. YIG10).**

Enfin, la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les résultats obtenus pour  $\epsilon$ ,  $\mu$  et  $\kappa$  de l'échantillon testé pour un champ appliqué de 700 Oe. Nous observons une permittivité mesurée  $\epsilon = 14.9$ , très proche de celle mesurée par le fabricant ( $\epsilon = 15$ ). Les spectres de  $\mu$  et  $\kappa$  présentent une fréquence de résonance voisine de 322 MHz.

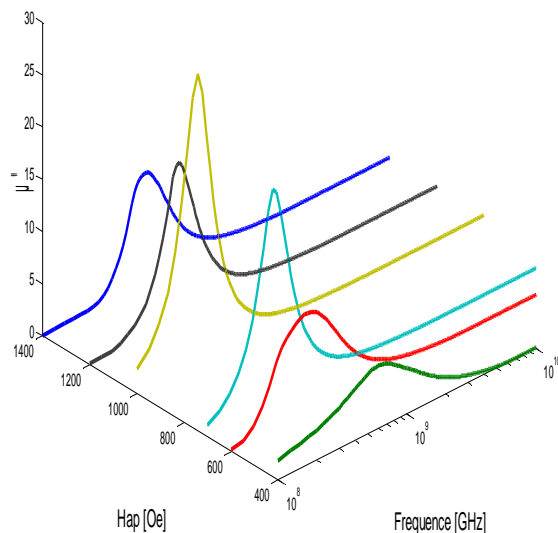
## 5. Applications de la méthode à la mesure de FMR et de largeur de raie d'absorption

### 5.a. FMR (Résonance Ferromagnétique)

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les spectres de la partie imaginaire  $\mu''$  obtenus pour plusieurs états d'aimantation pour l'échantillon Y101. Nous observons sur cette figure la variation de la FMR en fonction du champ appliquée.

L'analyse de ces résultats et celle des paramètres S de la cellule de mesure, nous permettent de noter que la fréquence à laquelle la transmission est minimale,  $f_0 = 2.2$  GHz (Figure 6) et la fréquence gyromagnétique (maximum des pertes magnétiques)  $f_{\text{res}} = 330$  MHz (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) sont très différentes. Cela prouve, grâce à l'analyse dynamique de la cellule de mesure, que la FMR est loin d'être égale à la fréquence qui correspond à une transmission minimale, contrairement à ce que considèrent certaines techniques de mesure [4].

Notre programme de dépouillement des mesures permet de déterminer les valeurs réelles de la FMR.



**Figure 8 Spectres de la partie imaginaire ( $\mu''$ ) pour plusieurs états d'aimantation pour l'échantillon Y101. ( $400 \text{ Oe} < H_{\text{app}} < 1600 \text{ Oe}$ )**

### 5.b. Détermination de la largeur de raie d'absorption ( $\Delta H$ )

La méthode développée permet aussi d'envisager la détermination des largeurs de raies d'absorption à mi-hauteur ( $\Delta H$  et  $\Delta H_{\text{eff}}$ ) pour déterminer les pertes du ferrite, et ce à différentes fréquences.

Pour caractériser ce paramètre, la technique conventionnelle utilise la méthode des perturbations en

structures résonantes (cavité résonante, ligne coplanaire)[4][5]. Cela fixe la fréquence à laquelle la largeur de raie est mesurée (en général 9,4 GHz ou 10 GHz pour les ferrites doux). L'avantage de notre approche expérimentale pour la détermination de la largeur de raie d'absorption des ferrites réside dans la possibilité d'effectuer des mesures de ces paramètres à différentes fréquences sans change de cellule ou d'échantillon. L'approche conventionnelle nécessiterait pour pouvoir le faire la mise en œuvre de différentes tailles de cavité et d'échantillons. Cela devient rédhibitoire à basses fréquences.

## 6. Conclusion

Le protocole expérimental présenté dans ce travail apporte des améliorations dans l'utilisation et la validation de la méthode de caractérisation en ligne triplaque non-réciproque. Ces nouvelles améliorations donnent des résultats cohérents et satisfaisants qui permettent d'envisager l'utilisation de cette méthode pour la détermination large bande et directe des éléments du tenseur de perméabilité. Cela nous permettra, notamment, de valider par comparaison avec l'expérience un modèle du tenseur de perméabilité développé en parallèle dans notre équipe [3] pour apporter aux fabricants de dispositifs non-réciproques à ferrites un outil de simulation prédictif. La détermination d'autres caractéristiques des ferrites aimantés est également autorisée : largeur de raie d'absorption ( $\Delta H$  et  $\Delta H_{\text{eff}}$ ), FMR, et aussi champ d'anisotropie et rapport gyromagnétique.

## 7. Bibliographie

- [1] A. Nicolson and G. Ross, "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM19, no. 4, pp. 337-382, Nov. 197.
- [2] J. Lezaca, P. Quéffélec, and A. Chevalier, "Broadband permeability measurement method for ferrites at any magnetization state: direct problem", *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, Vol. 3, pp 289-294, June 2011.
- [3] P. Gelin, and P. Quéffélec, "Generalized Permeability Tensor Model: Application to Barium Hexaferrite in a Remanent State for Self-biased Circulators", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, n°1, pp. 24-31, Jan. 2008.
- [4] S. S. Kalarickal et al, "Ferromagnetic resonance linewidth in metallic thin films: Comparison of measurement methods," *J. Appl. Phys*, vol. 99, pp. 093909-1–093909-7, 2006
- [5] J. Fermin, "Ferromagnetic Resonance Applications To New Materials", *Universidad del Zulia*.